

КОЭФФИЦИЕНТ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ СЕТИ В ТОЧКЕ ПОДКЛЮЧЕНИЯ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Г.Г.Жемеров, О.И.Ковальчук
Национальный Технический Университет
«Харьковский Политехнический Институт»
Кафедра «Промышленная и биомедицинская электроника»,
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе 21, НТУ «ХПИ»,
Тел./факс: (057) 707-63-12, E-mail: zhemerov@online.kharkiv.net

Annotation – Dependence between the active rectifier current THD and voltage THD at the network point of common coupling has been defined.

Key words – active rectifier, current THD, voltage THD, MatLab-model.

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые преобразователи переменного напряжения в постоянное средней и большой мощности делятся на три основных типа: неуправляемые выпрямители (НВ), управляемые выпрямители (УВ), активные выпрямители (АВ).

Неуправляемые выпрямители, силовая схема которых выполняется на диодах, потребляют из питающей сети токи трапецеидальной формы, содержащие все нечетные не кратные трем гармоники, и не могут работать в режиме рекуперации энергии в сеть.

Управляемые выпрямители на одно-операционных тиристорах имеют такую же форму сетевого тока как и НВ, но обеспечивают режим работы с двухсторонним потоком энергии между сетью и нагрузкой.

Общим недостатком НВ и УВ является сдвиг по фазе между основной гармоникой сетевого тока и напряжением сети, обуславливающий дополнительные потери энергии и уменьшение КПД преобразователя [1].

Активные выпрямители, - преобразователи сравнительно нового типа [2], [3], [4], - лишены недостатков, присущих НВ и УВ: токи, потребляемые АВ из сети близки по форме к синусоиде, а угол сдвига между основной гармоникой сетевого тока и напряжением сети может поддерживаться в процессе работы АВ рав-

ным заданному значению, в том числе, – 0 или π .

Недостатком АВ можно считать малый диапазон регулирования напряжения на выходе, а также необходимость широтно-импульсной модуляции (ШИМ) при формировании синусоиды сетевого тока и «накачке» энергии в фильтрующий конденсатор на выходе АВ, напряжение на котором поддерживается в 1,3 – 1,5 раз большим амплитуды линейного напряжения источника.

Коммутационные потери энергии в транзисторах и обратных диодах АВ пропорциональны частоте ШИМ. Поэтому при проектировании АВ с целью уменьшения потерь необходимо стремиться по возможности уменьшить частоту ШИМ. С другой стороны от частоты ШИМ и амплитуды высокочастотной составляющей сетевого тока АВ зависит коэффициент несинусоидальности напряжения на клеммах питающей сети, к которой помимо АВ могут быть подключены и другие нагрузки.

Настоящая работа посвящена определению зависимости коэффициента несинусоидальности напряжения на клеммах сети, к которым подключается АВ, от коэффициента несинусоидальности сетевого тока АВ, частоты ШИМ и других параметров.

Допустимые значения коэффициента несинусоидальности напряжения регламентируются стандартами, в частности ГОСТ 13109-97 [5], и их численное значе-

ние зависит от величины номинального напряжения сети. Так для сетей напряжением 6, 10 kV нормально допустимый коэффициент несинусоидальности напряжения составляет 5%, а предельно допустимый – 8%. Для сетей напряжением 0,38 kV эти коэффициенты соответственно составляют 8% и 12%.

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С АКТИВНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ

Система электроснабжения (СЭ) с АВ и другими нагрузками представлена на рис.1.

Активный выпрямитель и другие нагрузки подключены параллельно к клеммам *A*, *B*, *C* трехфазной промышленной сети переменного синусоидального напряжения u_s посредством трехпроводной или четырехпроводной, - нулевой провод показан на рис. 1 пунктиром, - линии. Индуктивность фазы сети L_S определяется с учетом параметров сетевого трансформатора, не показанного на рис. 1, и кабелей. На входе транзисторного моста из шести транзисторов с обратными диодами, *V1* – *V6*, включены три реактора. Индуктивность каждого из реакторов равна L_R , а активное сопротивление R_R . В четырехпроводной системе электроснабжения на выходе моста включают последовательно два конденсатора, общую точку которых соединяют с общей точкой источника. Напряжение на выходе АВ, U_0 , с помощью системы управления поддерживается неизменным и равным:

$$U_0 = kU_{SLM}, \quad (1)$$

где коэффициент k выбирается из диапазона значений

$$k = 1,3 - 1,5. \quad (2)$$

Соотношения (1) и (2) выполняются при условии, что транзисторный мост, реакторы и активно-емкостная нагрузка работают в режиме повышающего преобразователя с частотой ШИМ, - обозначим ее f_{mod} , - превышающей частоту сети f_s на один - два порядка.

Коэффициент несинусоидальности напряжения на клеммах сети может быть существенно уменьшен путем подключе-

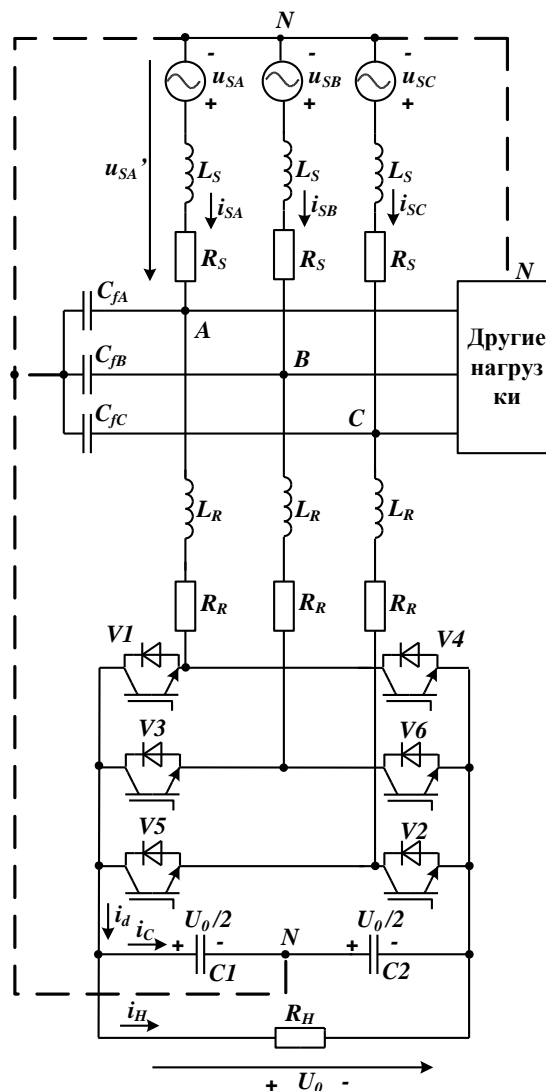


Рис. 1. Схема системы электроснабжения с АВ и другими нагрузками

ния к этим клеммам емкостного фильтра. Расчетная емкость конденсатора фильтра при частоте модуляции в несколько килогерц получается относительно небольшой.

Помня об этой возможности, будем рассматривать схему АВ, в которой отсутствуют как фильтр, так и параллельные активному выпрямителю нагрузки, поскольку такое условие является наиболее жестким, соответствующим максимальному значению коэффициента несинусоидальности напряжения.

Системы управления АВ можно разделить на два типа:

- с постоянной частотой ШИМ, $f_{mod} = const$;

- с переменной частотой ШИМ, $f_{mod}=var$.

Системы управления второго типа выполняются на принципе сравнения синусоидального тока задания с фактическим значением фазного тока и воздействия разностным током на вход гистерезисного элемента, выходные сигналы которого включают один из пары транзисторов в каждой из трех фаз АВ.

В настоящей работе предлагается общий для двух указанных типов систем управления метод расчета коэффициентов несинусоидальности токов и напряжений в схеме АВ.

Сначала рассмотрим АВ с системой управления с постоянной частотой модуляции.

Будем считать известными следующие величины:

U_{0nom} – номинальное напряжение на выходе;

I_{0nom} – номинальный ток нагрузки;

$U_{Sm}=U_{Smnom}$ – амплитуда синусоидального фазного номинального напряжения сети;

I_{S1mnom} – амплитуда основной гармоники фазного номинального тока сети, основная гармоника тока сети совпадает по фазе с фазным напряжением сети;

f_S – частота напряжения сети;

L_R – индуктивность фазы реактора;

f_{mod} – частота ШИМ;

e_k – напряжение короткого замыкания сети, определяемое как:

$$e_k = \frac{2\pi f_S L_S I_{Smnom}}{U_{Sm}}, \quad (3)$$

где L_S – индуктивность фазы сети (рис. 1).

Соотношение (3) справедливо, если номинальная мощность сети равна номинальной мощности АВ. Очевидно, что это наихудший случай при определении коэффициента несинусоидальности напряжения на клеммах сети. При увеличении номинальной мощности сети и подключении дополнительной линейной нагрузки коэффициент несинусоидальности напряжения будет меньше чем в рассматриваемом наихудшем случае.

Будем считать, что коэффициент полезного действия системы электроснабжения близок к единице. Такое допущение позволяет принять, что транзисторные ключи идеальны и что:

$$R_S = R_R = 0. \quad (4)$$

С учетом (4) номинальная мощность АВ:

$$P_{nom} = \frac{3}{2} U_{Sm} I_{S1mnom} = U_{0nom} I_{0nom}. \quad (5)$$

Точный расчет коэффициентов несинусоидальности, требующий определения сумм квадратов высших гармоник тока и напряжения, может быть выполнен с помощью *MatLab*-модели.

С целью получения приближенных аналитических соотношений, упростим задачу, допустив, что кривая фазного тока АВ представляет собой сумму двух синусоид, одна из которых имеет частоту сети, f_S , а другая – частоту модуляции, f_{mod} :

$$i_S = i_{S1} + i_{Svar} = I_{S1m} \sin 2\pi f_S t + I_{Svarm} \sin 2\pi f_{mod} t, \quad (6)$$

где I_{S1m} – амплитуда основной гармоники фазного тока;

I_{Svarm} – амплитуда высшей гармоники фазного тока.

В соответствии с (5) коэффициент несинусоидальности тока

$$THD_I = \frac{I_{Svarm}}{I_{S1m}}. \quad (7)$$

Фазное напряжение на клеммах сети имеет три составляющие: синусоидальное напряжение u_S , падение напряжения от тока основной гармоники на индуктивности L_S , падение напряжения от тока с частотой модуляции на индуктивности L_S . Как правило, падение напряжения от основной гармоники тока АВ на индуктивности L_S не превышает 10 % от напряжения источника u_S . Поэтому коэффициент несинусоидальности напряжения на клеммах сети можно определять как:

$$THD_U = \frac{I_{Svarm} 2\pi f_{mod} L_S}{U_{Sm}}. \quad (8)$$

Из (7) и (8) получим:

$$THD_U = THD_I \frac{I_{S1m} 2\pi f_{mod} L_S}{U_{Sm}}. \quad (9)$$

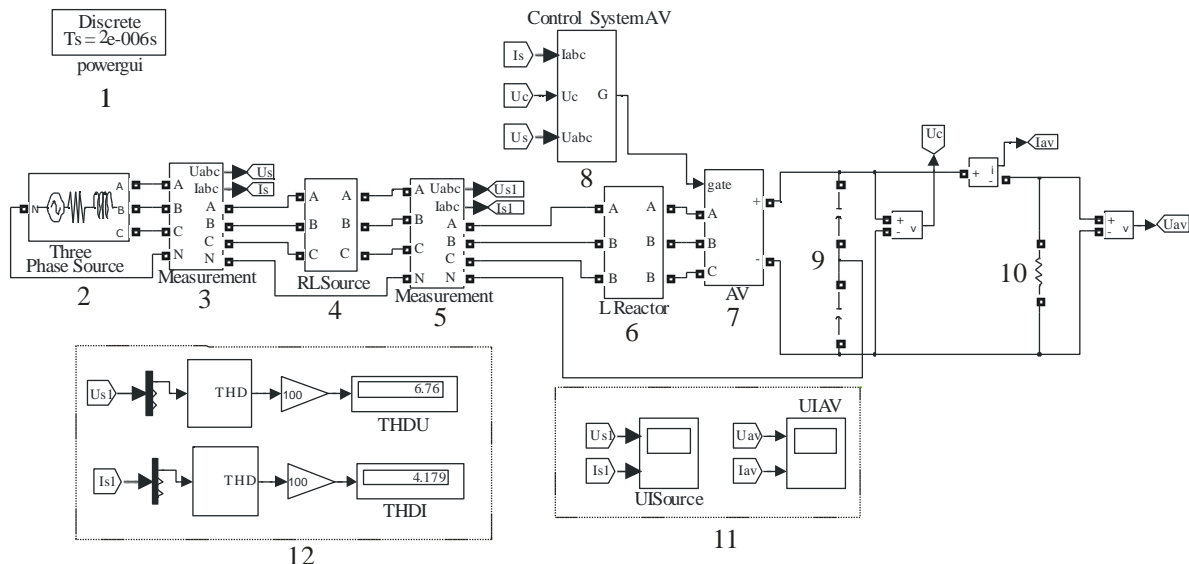


Рис.2. MatLab-модель АВ

Подставив в (9) значение L_S из (3), получим расчетную формулу:

$$THD_U = THD_I \cdot e_K \frac{f_{mod}}{f_S} \frac{I_{S1m}}{I_{S1nom}}. \quad (10)$$

Расчетная формула (10) приближенная, учитывающая только одну гармонику переменной составляющей тока сети. Если переменную составляющую разложить в ряд Фурье и учесть несколько гармоник ряда, то формулу (10) можно уточнить. Определим погрешность формулы (10) в MatLab-эксперименте.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА НА MATLAB-МОДЕЛИ

MatLab-модель активного выпрямителя номинальной мощностью 10 MW приведена на рис. 2.

Модель состоит из двенадцати блоков, которые могут быть разбиты на следующие группы:

- Силовая схема – блоки 2, 4, 6, 7, 9, 10;
- Система управления – блок 8;
- Датчики тока и напряжения – блоки 3, 5;
- Многолучевые осциллографы – блок 11;
- Цифровые измерительные приборы – блоки 12;
- Вспомогательные блоки – блок 1.

Назначение блоков силовой схемы:

2 – блок напряжения питающей сети, моделирующий трехфазную систему синусоидальных напряжений с возможностью задания действующего значения линейного напряжения питающей сети;

4 – блок активных сопротивлений и индуктивностей питающей сети;

6 – блок реакторов АВ;

7 – блок активного выпрямителя, выполненный по шестипульсовой мостовой схеме с возможностью задания параметров IGBT-транзисторов, снабберов и обратных диодов;

9 – блок выходного конденсатора АВ;

10 – блок нагрузки, моделирующий активную нагрузку.

Варианты системы управления активным выпрямителем (блок 7) приведена на рис. 3 и 4. Система управления осуществляет выработку управляющих импульсов транзисторов АВ. Все сигналы, циркулирующие в системе управления, представлены в относительных единицах. Отличие приведенных двух систем управления заключается в том, что векторная система работает с постоянной частотой модуляции, а релейная – с переменной. Датчики тока и напряжения осуществляют измерения фазных токов и напряжений питающей сети (блоки 3, 5), тока и напряжения нагрузки. Все эти данные выводятся на многолучевые осциллографы (блок 11).

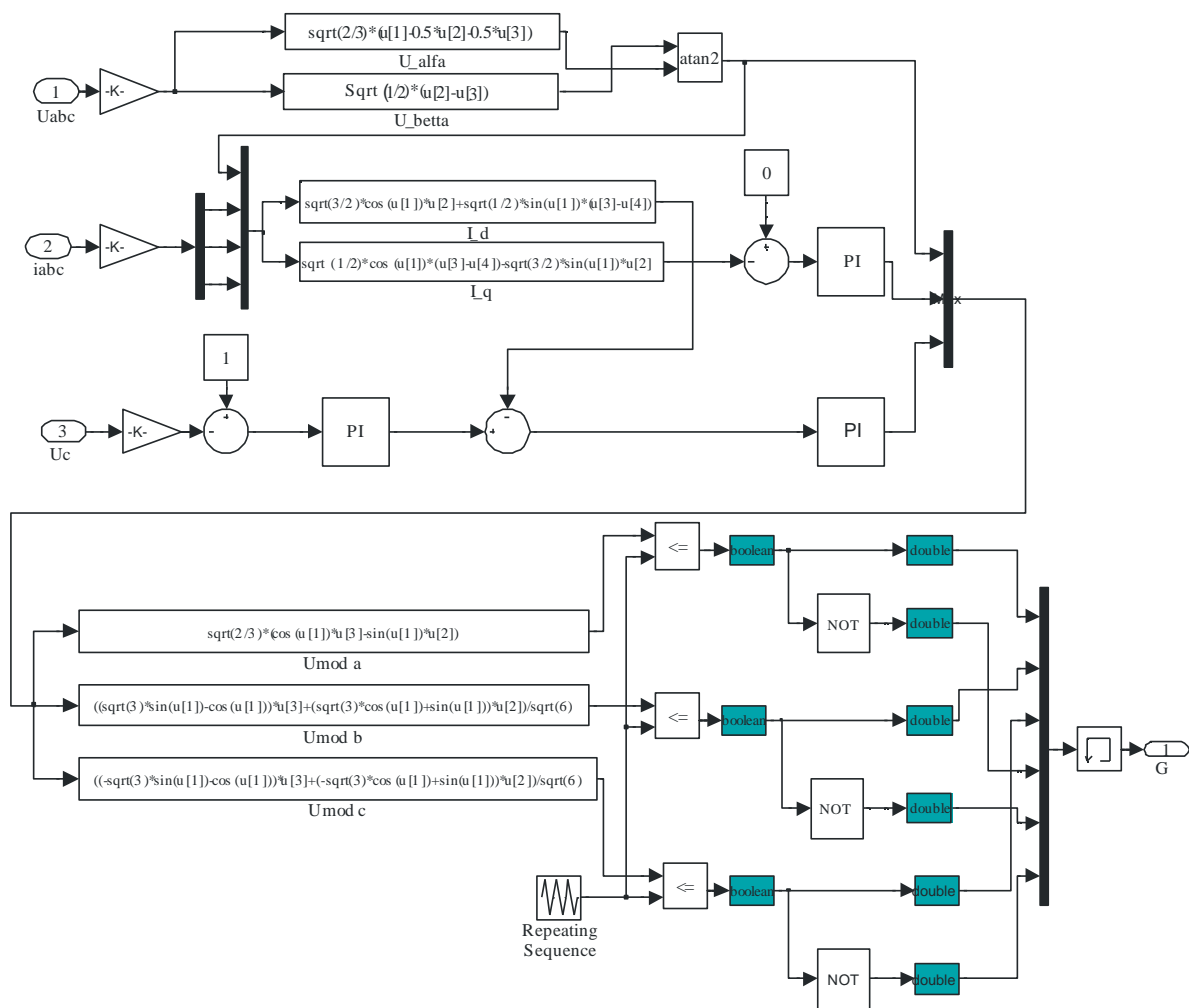


Рис. 3. *MatLab*-модель векторной системы управления АВ

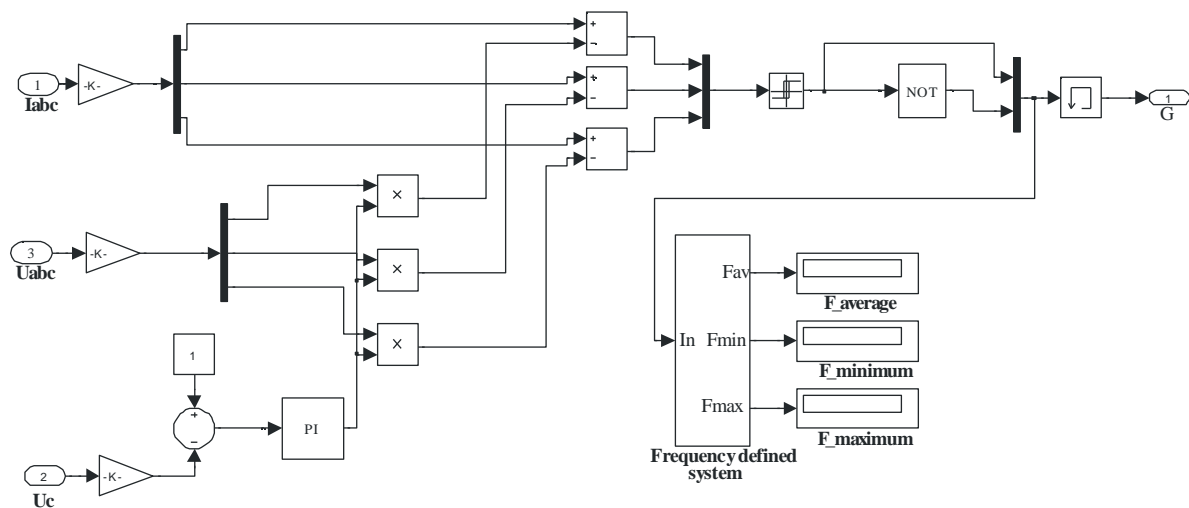


Рис. 4. *MatLab*-модель релейной системы управления АВ

В блоке 12 рассчитывается коэффициент несинусоидальности напряжения и тока сети, значения которых выводятся на цифровые приборы в процентах.

На рис. 5 приведены осциллограммы фазных токов и напряжений сети *MatLab*-

модели активного выпрямителя с векторной и релейной системами управления при мощности нагрузки 5 MW.

Результаты экспериментальных данных для АВ с векторной и релейной системами управления приведены в табл. 1 и

в табл. 2 соответственно. При проверке выражения (10) для АВ с релейной системой управления оперируем понятием средней частоты модуляции, $f_{mod av}$:

$$f_{mod av} = \frac{f_{mod min} + f_{mod max}}{2}, \quad (11)$$

где

$$f_{mod max} = \frac{\sqrt{3}kU_{Sm}}{8L_{\Sigma}\Delta I_{Sm}}, \quad (12)$$

$$f_{mod min} = \frac{\left(-1 + \frac{3}{4}k^2\right)U_{Sm}}{2\sqrt{3}kL_{\Sigma}\Delta I_{Sm}}, \quad (13)$$

$$L_{\Sigma} = L_S + L_R, \quad (14)$$

ΔI_{Sm} – пределы изменения тока задания (гистерезис) в релейном регуляторе.

Таблица 1 – Экспериментальные данные проверки зависимости (10) при векторной системе управления

e_K	f_{mod}	P_{AV}	THD_I	THD_U (экс.)	THD_U (ф-ла)
	Hz	MW	%	%	%
0,05	3000	2	6,6	5,3	3,96
		5	2,7	5,2	4,05
		8	1,7	4,9	4,08
		10	1,5	4,7	4,45
	5000	2	3,5	5,3	3,5
		5	1,4	5,1	3,5
		8	1	4,8	4
		10	0,8	4,7	3,96
	7000	2	2,3	5,3	3,22
		5	1	5,1	3,5
		8	0,8	4,8	4,48
		10	0,6	4,7	4,16
0,1	3000	2	6	8,6	7,2
		5	2,5	8,3	7,5
		8	1,7	8,7	8,16
		10	1,4	8,8	8,4
	5000	2	3,2	8,6	6,4
		5	1,3	8,3	6,5
		8	1	8,7	8
		10	0,8	8,8	8
	7000	2	2,2	8,7	6,16
		5	0,9	8,3	6,3
		8	0,7	8,7	7,84
		10	0,6	8,8	8,4

В результате проведения эксперимента на *MatLab*-модели было выявлено, что относительная погрешность расчета по сравнению с экспериментально полученными данными составила 20 %. Выраже-

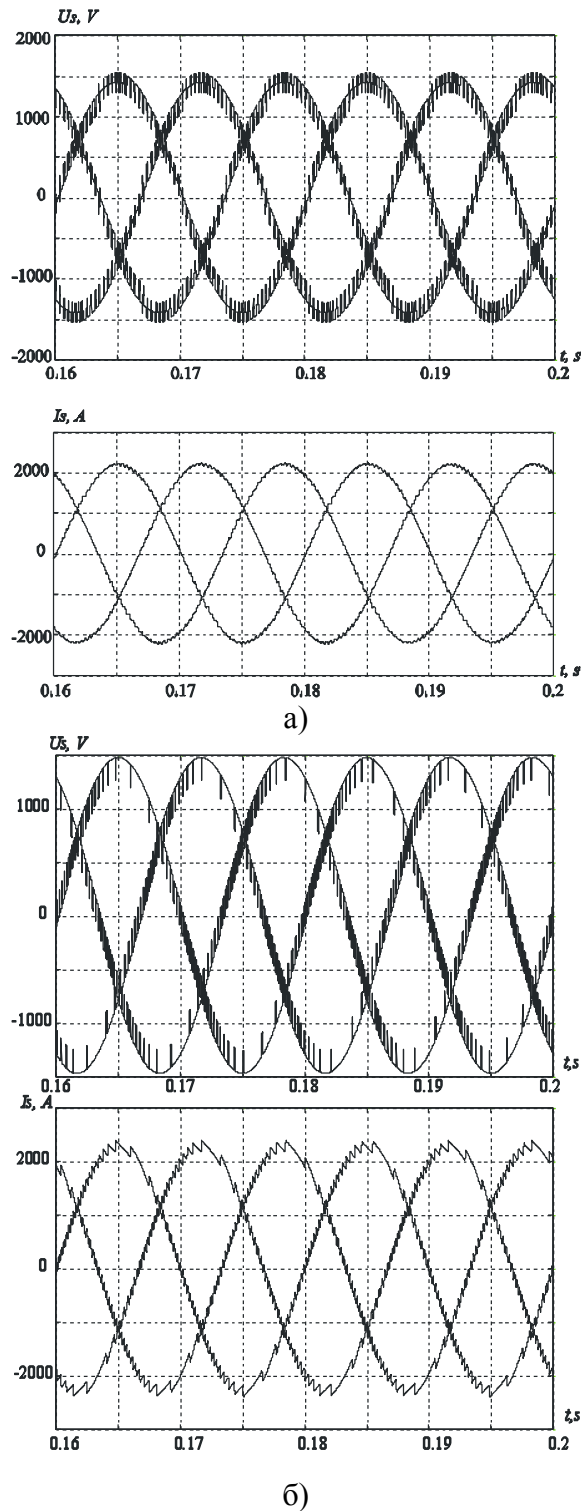


Рис. 5. Осциллограммы токов и напряжений сети при работе АВ с векторной (а) и релейной (б) системами управления

ние (10) для определения коэффициента несинусоидальности напряжения справедливо как для АВ работающего с постоянной частотой модуляции, так и для АВ с переменной частотой модуляции. На рис. 6 приведены графики зависимости отношения фактического коэффициента несинусоидальности напряжения к расчетному от частоты модуляции при разных значениях относительного тока сети.

Таблица 2 – Экспериментальные данные проверки зависимости (10) при релейной системе управления

e_K	ΔI_{Sm}	f_{modav}	P_{AV}	THD_I	THD_U (экс.)	THD_U (ф-ла)
	%	Hz	MW	%	%	%
0,05	2	3124	2	9,3	7,9	5,8
		2927	5	3,6	7,6	5,3
		2968	8	2,7	7	6,4
		2943	10	2,2	6,8	6,5
	1	5729	2	5	7,9	5,7
		5283	5	2	7,7	5,3
		4851	8	1,7	7	6,6
		5014	10	1,3	6,8	6,5
	0,7	7645	2	3,8	7,9	5,8
		7093	5	1,4	7,6	5
		6711	8	1,1	7	5,9
		6468	10	0,9	6,8	5,8
0,1	2	2869	2	12	18,2	14
		2672	5	5	17,4	13,3
	1	2531	8	2,8	15,6	11,33
		2672	10	2,5	14,4	13,36
		5264	2	7	18,2	14,7
		4774	5	3,2	17,4	15,3
	0,7	4577	8	2,1	15,6	15,3
		4361	10	1,6	14,4	13,9
		7102	2	5	18,2	14,2
		6405	5	2,5	17,4	16
		5650	8	1,7	15,6	15,3
		5115	10	1,4	14,4	14,3

Как видно из экспериментально полученных данных коэффициент несинусоидальности тока и напряжения сети при использовании релейной системы управления выше, чем при применении векторной системы. Поскольку релейная система

обладает рядом преимуществ, например, высокой устойчивостью, имеет смысл применить емкостной фильтр на входе АВ.

Рассчитать величину емкости фильтра можно задавшись допустимой величиной тока сети с частотой ШИМ и допустимым коэффициентом несинусоидальности напряжения.

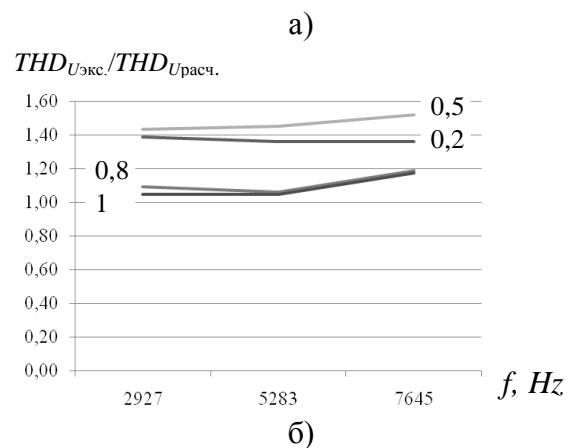
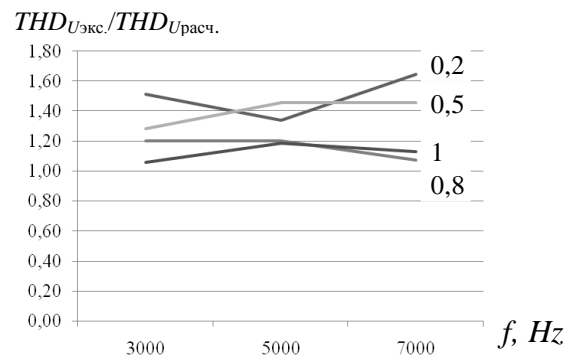


Рис. 6. Зависимости отношения фактического коэффициента несинусоидальности напряжения к расчетному от частоты модуляции при разных значениях относительного тока сети для АВ с векторной (а) и релейной (б) системами управления

Напряжение на конденсаторе фильтра с частотой модуляции:

$$U_{C_f \text{ var } m} = \frac{1}{2\pi f_{\text{mod}} C_f} I_{S \text{ var } m}. \quad (15)$$

Коэффициент несинусоидальности напряжения сети:

$$THD_U = \frac{U_{C_f \text{ var } m}}{U_{Sm}} = \frac{1}{2\pi f_{\text{mod}} C_f} \frac{I_{S \text{ var } m}}{U_{Sm}}, \quad (16)$$

где

$$I_{S\text{ var}m} = v I_{S1mnom}, \quad (17)$$

$$v = 3 - 10\%. \quad (18)$$

Величина параметра v зависит от предъявляемых к конкретному преобразователю требований.

С учетом (16) – (17) получаем:

$$C_f = \frac{v I_{S1mnom}}{2\pi f_{\text{mod}} THD_U U_{Sm}}. \quad (19)$$

При подключении емкостного фильтра на входе АВ могут возникать резонансные явления из-за образующихся колебательных контуров ($C_f - L_S$ и $C_f - L_R$), что приводит к увеличению THD_U и THD_I .

ВВЫВОДЫ

1. Получена приближенная расчетная формула для определения THD_U напряжения сети в точке подключения АВ по THD_I тока, потребляемого АВ из сети.

2. Показано, что THD_U приближенно равен THD_I , умноженному на напряжение короткого замыкания сети в точке подключения АВ, на отношение частоты модуляции к частоте питающей сети и на отношение амплитуды основной гармоники фазного тока к амплитуде основной гармоники номинального фазного тока сети. Погрешность приближенной формулы составляет около 20 %.

3. Полученная формула справедлива как для АВ с векторной системой управления, так и для АВ с релейной системой управления. В последнем случае - при эквивалентной средней частоте модуляции.

[1] Г.Г. Жемеров, Н.А. Ильина, О.В. Ильина, О.И. Ковальчук, Е.И. Сокол. КПД трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения с ассиметричной нагрузкой. Технічна електродинаміка: Тематичний випуск „Силова електроніка та енергоефективність”, ч. 1, Київ – 2010. – С. 22 – 31.

[2] Jose R. Rodriguez, Juan W. Dixon, Jose R. Espinoza, Jorge Pontt, Pablo Lezan, “PWM Regenerative rectifiers: state of the art”, IEEE Transactions on Industrial electronics, vol. 52, no. 1, pp. 5-22, 2005.

[3] Г.С. Зиновьев, Л.Г. Золотов и др. Пути эволюции многоуровневых инверто-

ров напряжения. Технічна електродинаміка, тем. вип. «Проблеми сучасної електроніки» - Киев, 2008, - ч. 6, сс. 58-69.

[4] Zhe Chen, Josep M. Guerrero, Frede Blaabjerg. A Review of the state of the art of power electronics for wind turbines IEEE Trans on Power Electronics, vol. 24, no 8, 2009, pp. 1859-1875.

[5] ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М. Госстандарт. 1998. – 32 с.